

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqfh.240236

# 基于“无废城市”理念的高速公路RAP厂拌热再生技术研究

彭彬

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

**摘要:** 以海南省G98环岛高速改建工程为背景,研究经厂拌热再生技术处理后的沥青路面废弃料(RAP)可回收利用,减少环境污染及经济造价。把RAP掺量分为30%、40%、50% 3种进行设计成再生沥青混合料,通过在旧沥青中添加5档不同掺量的再生剂,对比沥青的针入度、软化点、延度3大指标,确定最佳再生剂用量,利用马歇尔试验确定最佳油石比,可制备成级配稳定的AC-20再生沥青混合料,并分别进行高温稳定性研究和水分稳定性研究,结果表明:添加不同掺量的RAP均可有效提升高温稳定性,使抗变形能力增强,当RAP掺量为40%时,水分稳定性表现为最好,各项路用性能均满足规范所要求。综上所述,厂拌热再生技术完全可以在海南省进行大规模应用。

**关键词:** 再生沥青混合料;室内试验;高温稳定性;水分稳定性;RAP

中图分类号: U414

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0216-05

## Study on Plant Mixed Hot Reclaiming Technology of Expressway RAP Based on “No-waste City” Concept

PENG Bin

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

**Abstract:** Taking the Hainan Province G98 Roundabout Expressway Reconstruction Project as the background, the recyclable utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) treated by the plant mixed hot reclaiming technology is studied to reduce the environmental pollution and economic costs. The RAP content is divided into three types of 30%, 40% and 50% to design the reclaimed asphalt mixture. By adding five different contents of reclaiming agent in the old asphalt, three major indicators of needle penetration, softening point and ductility of asphalt are compared to determine the optimal content of reclaiming agent. The Marshall test is used to determine the optimal oil aggregate ratio to prepare the stable graded AC-20 reclaimed asphalt mixture. And the high-temperature stability and water stability are studied. The results show that adding the different contents of RAP can effectively improve high-temperature stability and enhance the deformation resistance. When the RAP content is 40%, the water stability is the best, and all pavement performances meet the requirements of the specifications. In summary, the plant mixed hot reclaiming technology can be widely applied in Hainan Province.

**Keywords:** reclaimed asphalt mixture; laboratory test; high-temperature stability; water stability; reclaimed asphalt pavement (RAP)

## 0 引言

随着海南省近20 a年公路建设发展,在大力提升了公路运输能力同时,也迎来了公路养护、维修及建设高峰期。工程背景将原有崖州湾科技城段G98高速公路由路基改造为隧道形式。而在建设、养护过程中会产生大量的沥青路面废弃料简称“RAP”,若

这些废弃料处理不合理,则容易造成资源浪费和环境污染。因此,对于RAP的研究处理对社会经济具有较大的意义。相比国外发达国家,我国RAP的再生利用率不足70%。目前国内对于RAP的处理主要为就地热再生与冷再生技术、厂拌热再生与冷再生技术,冷再生技术再生的沥青混合料多用于沥青路面基层,热再生技术再生沥青混合料多用于沥青路面面层的中下面层。本次工程是将原有崖州湾科技城段G98高速公路由路基改造为隧道形式,在结合海南省当地气候环境本次研究选择厂拌热再生技术

收稿日期: 2024-03-05

作者简介: 彭彬(1983—),男,硕士,高级工程师,从事道路交通专业的规划、设计与研发工作。

为沥青废料的处理方式,厂拌热再生技术更能提高RAP的利用率,减少RAP的浪费<sup>[1-3]</sup>。处理完成后把RAP分为不同掺量,分别加入沥青料混合料并对其进行性能试验。因此解决海南省公路建设面临的环境保护与集料匮乏问题,促进筑路材料循环再利用,降低沥青路面维修与改建成本具有重要的意义。

## 1 原材料性能

### 1.1 新沥青性能检测

新沥青:为茂名石化东海牌改性沥青,对其进行性能指标检测,检测结果见表1。

表1 新沥青基本性能指标

检测项目	性能指标	技术要求	试验方法
针入度(25℃,5s,100g)/0.1mm	58.7	40~60	T0604
针入度指数PI	-0.6	-1.5~1.0	T0604
延度(5℃)/10cm	27.1	≥20	T0605
软化点(环球法)/℃	75.4	≥75	T0606
闪点/℃	304	≥230	T0611
溶解度/%	99.41	≥99	T0607
密度(25℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.056	实测	T0603
运动黏度(135℃)/(Pa·s)	2.23	≤3	T0619
48h离析/℃	0.8	≤2.5	T0661
弹性恢复(25℃)/%	89	≥75	T0662
TFOT后残留物			
质量变化/%	0.041	绝对值不>1	T0610
针入度比(25℃)/%	75	≥65	T0604
延度(5℃,5cm/min)/cm	17	≥15	T0605

表3 RAP各筛孔通过率

筛孔/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
0~6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	69.2	56.5	29.7	18.4	9.2	6.5
6~15	100.0	100.0	100.0	98.7	76.5	29.3	18.7	15.9	13.8	10.1	7.6	5.2
15~20	100.0	86.7	71.1	45.5	22.2	12.1	10.4	8.9	7.7	5.3	4.1	3.2

表4 RAP旧集料性能检测结果

检测项目	0~2.36mm	2.36~4.75mm	4.75~9.5mm	9.5~20mm	技术要求
表观相对密度	2.702	2.714	2.721	2.732	≥2.5
毛体积相对密度	2.602	2.625	2.634	2.677	—
吸水率/%	1.5	1.2	1.32	0.75	≤3.0

### 1.5 再生剂的选择及用量

由表2可知,回收后的沥青针入度指标和延度指标达不到施工规范要求,经过长期时间老化,其低温抗裂性、水稳定性、黏附性、耐久性等性能也满足不了使用要求,需添加再生剂帮其改善性能。本次研究中再生剂选用为美德维实伟克 Evoflex 再生剂(再

### 1.2 废旧沥青基本性能检测

RAP取自海南省G98高速沥青路面经铣刨得到的上面层,采用离心分离法对RAP进行抽提<sup>[4]</sup>,抽提后旧沥青检测指标结果见表2。

表2 RAP试验结果

检测项目	检测结果	技术要求	试验方法
25℃针入度/0.1mm	31.5	60~80	T0604-2011
15℃延度/cm	2.9	>20	T0605-2011
软化点/℃	64.5	≥46	T0606-2011
0~6mm	3.1		
含水率6~15mm/%	1.5	实测值	JTG/T5521—2019
15~20mm	0.2		

将破碎后的RAP分为0~6mm、6~15mm、15~20mm3档,各筛孔通过率见表3。本次得到的RAP料经过实验室筛分处理,与实际铣刨后在拌合站使用的略有差异。表4为抽提后各档位集料性能检测结果。由上诉可知旧集料各性能均都能满足相关规范要求。

### 1.3 集料

集料为海南本地玄武岩,对其性能进行检测,检测均满足所需技术要求<sup>[5]</sup>。检测结果表明,所选集料满足施工技术要求。

### 1.4 填料

填料为石灰岩石料经磨细得到的粒径小于0.075mm的矿粉,矿粉内洁净无杂质并保持干燥。按规范要求对其进行检测,检测结果见表5。检测结果显示性能和质量技术要求均满足规范要求。

表5 RAP各筛孔通过率

检测项目	检测结果	技术要求	试验方法
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.714	≥2.50	T0352
含水率/%	0.6	≤1	T0332
亲水系数	0.615	≤1	T0353
加热安定性	无变质	无变质	T0355
塑性指数	2.5	≤4	T0355
外观	无团结粒块	无团结粒块	—
<0.075mm	90.2	75~100	
粒度范围<0.15mm	97.6	90~100	T0351
<0.6mm	102.3	100	

生剂选择均满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)要求)。分别添加五种不同掺量的再生剂0%、2%、4%、6%、8%进行试验,对比再生沥青的3大指标,确定最佳再生剂用量。其结果见表6。

表6 不同再生剂掺量下的再生沥青的3大指标

检测项目	0%	2%	4%	6%	8%
25℃针入度/(0.1 mm)	29.5	35.1	47.4	62.2	80.7
软化点/℃	65.9	63.5	59.7	56.4	52.3
15℃延度/cm	2.5	14.4	31.3	54.7	79.1

由图1至图3可知,再生沥青的针入度和延度随着再生剂的掺量增加而逐渐增大,软化点逐渐减小,针入度提升2.74倍,延度增加76.6 cm,软化点降低20.6%。旧沥青的各项性能随着再生剂的增加而有所改善,改善情况与其掺量有密切关系。但为了避免因再生剂掺量过量导致沥青过度软化,使其高温性能不能满足相关要求,本次研究选用针入度指标做为再生剂的再生效果<sup>[6]</sup>。当再生剂掺量到达6.8%时,再生沥青针入度为78.4,软化点及延度也能基本满足相关要求,因此再生剂最佳掺量为6.8%。

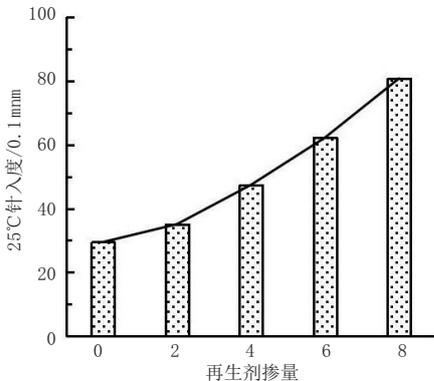


图1 再生沥青针入度变化图

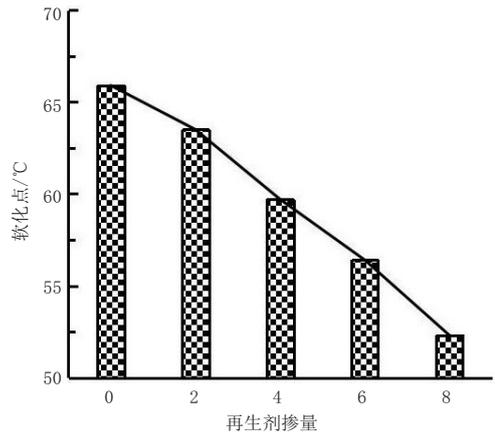


图2 再生沥青软化点变化图

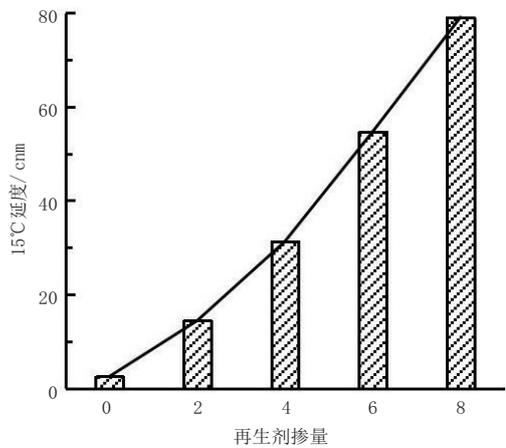


图3 再生沥青延度变化图

## 2 再生沥青混合料配合比设计

为做到循序渐进,拟将RAP最终设计至中面层或下面层使用的混合料,本次研究中将RAP用于AC-20混合料的拌制。设计了30%、40%、50%三组不同RAP掺量进行试验对比,设计均满足相关规定<sup>[4]</sup>。试验结果见表7。

表7 再生混合料合成级配

单位:%

合成级配	筛孔(mm)通过率											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
RAP掺量30%	100	93.2	85.1	72.5	60.4	44.8	28.8	20.0	13.2	9.4	7.8	5.6
RAP掺量40%	100	93.1	86.2	72.8	60.7	43.5	28.1	19.4	12.9	10.2	7.5	5.6
RAP掺量50%	100	94.9	86.8	73.3	60.9	40.1	26.9	18.7	11.2	9.1	7.1	5.3
级配上限	100	100	92	80	72	56	44	33	24	17	13	7
级配下限	100	90	78	62	50	26	16	12	8	5	4	3

由图4和表7可知,试验所选的三组RAP掺量与再生混合料级配相比,差异并不大,都接近AC-20级配中值。

把再生沥青混合料的最佳油石比设置为4.4%,按±0.3间隔变化,制作5组马歇尔试件,并对其进行

试验。分别对稳定度、空隙率、矿料间隙率等指标进行测试。测试结果见表8。

由表8可知,再生沥青混合料最佳油石比为4.4%,按最佳油石比所拌制的混合料均能满足相关规范要求。

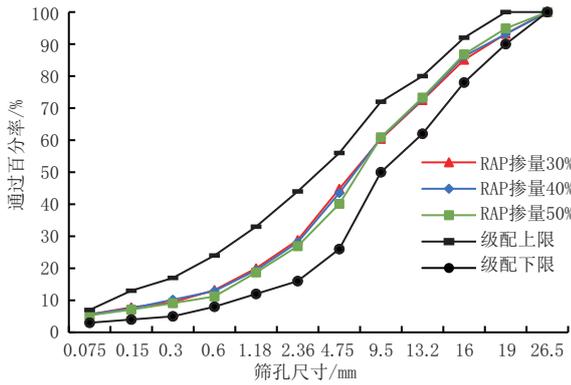


图4 不同RAP掺量下混合料合成级配图

表8 混合料马歇尔试验结果

油石比/%	毛体积相对密度	理论最大相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/0.1 mm
3.8	2.362	2.524	6.3	13.6	54.5	10.72	1.9
4.1	2.378	2.519	5.7	13.5	61.2	12.29	3.4
4.4	2.386	2.491	4.5	13.7	66.2	14.53	3.7
4.7	2.376	2.480	4.2	14.3	71.4	13.81	4.3
5.0	2.369	2.463	3.8	15.1	75.8	10.97	4.6

### 3 再生沥青混合料路由性能

#### 3.1 高温稳定性

为了测试再生沥青混合料通过车辆反复荷载,在高温环境下永久不产生变形的能力。本文将通过对不同RAP掺量下的再生沥青混合料进行车辙试验,研究其路由性能。动稳定度计算公式如下:

$$DS = \frac{(t_2 - t_1)N}{d_2 - d_1} C_1 C_2 \quad (1)$$

式中:DS为试件的动稳定度,次/mm;  $d_2$ 、 $d_1$ 为试件在  $t_1$ 、 $t_2$ 时的变形量,mm;  $C_1$ 、 $C_2$ 为系数,通常均取1.0;  $N$ 为车轮往返速度,次/mm。

由图5可知,再生沥青混合料的动稳定度随着RAP掺量的增加呈线性增长趋势,当RAP掺量为30%时,车辙试件平均动稳定度为3 429次/mm;当RAP掺量为40%时,车辙试件平均动稳定度为3 897次/mm;当RAP掺量为50%时,车辙试件平均动稳定度为4 276次/mm。其原因是RAP中的旧沥青经长时间而导致老化变硬,使其抗变形能力增强。如上述所示RAP对高温稳定性有积极作用。

#### 3.2 水温稳定性

本次工程背景海南省为我国最南端省级行政区,属于热带季风气候,全年降雨充沛,需要路面对抵抗水损害能力较高。因此,水稳定性极为重要。本次将采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,分别

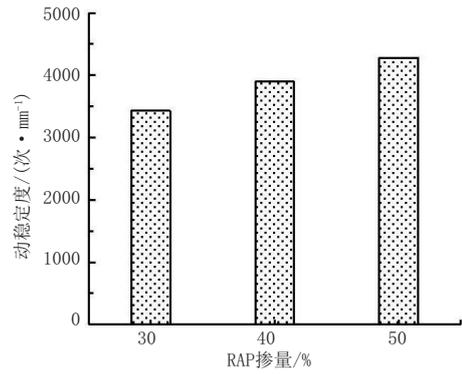


图5 车辙试验结果图

对不同RAP掺量下的再生沥青混合料进行试验,检测其水稳定性。以残留稳定度比为浸水马歇尔试验中的再生沥青混合料水稳定性评价指标。公式见式(2)。

$$MS_0 = \frac{MS_1}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $MS_0$ 为马歇尔试件的残留稳定度比,%;  $MS_1$ 为马歇尔试件浸水48 h后稳定度,kN;  $M_s$ 为马歇尔试件浸水30 min后稳定度,kN。

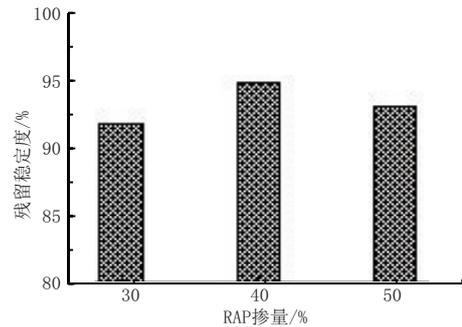


图6 浸水马歇尔试验结果图

根据相关规范要求,潮湿地区改性沥青混合料残留稳定度比要大于85%<sup>[7]</sup>。试验结果表明:当RAP掺量为30%时,残留稳定度比为91.4%;当RAP掺量为40%时,残留稳定度比为94.7%;当RAP掺量为50%时,残留稳定度比为92.9%。3种再生沥青混合料的残留稳定度比均高于90%,都满足相关规范要求。当RAP掺量为40%时出现峰值,为再生沥青混合料残留稳定度比的最大值。如上述所示RAP具有良好的抗水损坏能力。

冻融劈裂试验以残留稳定度比为评价指标,见式(3)~式(5)。

$$R_{T1} = \frac{0.006 287 P_{T1}}{h_1} \quad (3)$$

$$R_{T2} = \frac{0.006 287 P_{T2}}{h_2} \quad (4)$$

$$TSR = \frac{\overline{R_{T2}}}{R_{T1}} \times 100 \quad (5)$$

式中: $P_{T1}$ 为未经冻融的马歇尔试件试验荷载,N; $P_{T2}$ 为经过冻融的马歇尔试件试验荷载,N; $h_1$ 、 $h_2$ 为未经冻融及经过冻融的马歇尔试件高度,mm; $\overline{R_{T1}}$ 为未经冻融的马歇尔试件劈裂抗拉强度均值,MPa; $\overline{R_{T2}}$ 为经过冻融的马歇尔试件劈裂抗拉强度均值,MPa; $TSR$ 为冻融劈裂强度比,%。

由图7可知,冻融劈裂试验结果表明,当RAP掺量为40%时再生沥青混合料的残留强度比到达峰值,随后呈降低趋势,与浸水马歇尔试验得出的结论一致。总体来说再生沥青混合料在不同RAP掺量下均具有较高的残留强度比。因海南省气候影响,全年基本不会出现极寒天气,再生沥青混合料的低温性能可以暂不考虑。

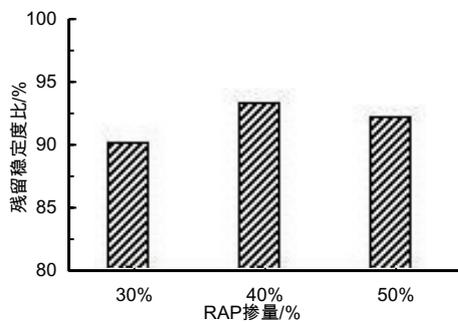


图7 冻融劈裂试验结果图

## 4 结 语

(1)RAP经厂拌热再生技术处理后,通过试验对

比确定再生剂最佳用量为6.8%,最佳油石比为4.4%,设计出的配合比,是可以制备出级配稳定的大掺量AC-20再生沥青混合料。

(2)对不同RAP掺量下的再生沥青混合料进行车辙试验测试,结果显示添加RAP可以有效提升高温稳定性,可应用于路面中面层或下面层,充分利用其抗变形能力。

(3)室内浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验结果显示,三种不同RAP掺量下的再生沥青混合料的残留稳定度比结果,均都能满足所需相关规范。当RAP掺量为40%时,其水稳定性最好。

(4)海南省推广路面厂拌热再生技术的经济、环境效益十分可观,结合G98环岛高速的改建工程项目,该技术的应用前景十分广阔。

### 参考文献:

- [1] 李文博.厂拌热再生沥青混合料应用技术研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2019.
- [2] 李泉,韩庆奎,张继森,等.高废旧料掺量厂拌热再生技术性能研究[J].中外公路,2018,38(6):301-304.
- [3] 曹志国.温拌再生沥青混合料疲劳特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [4] 曲恒辉,张树文,赵佃宝,等.RAP中旧沥青回收试验方法改进研究[J].山东交通科技,2021(3):7-10.
- [5] JTG E42—2005,公路工程集料试验规程[S].
- [6] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [7] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范(附条文说明)[S].

(上接第206页)

首先对出现脱落的缺陷部位进行清理,深度直至坚实基层,四周各向外扩出10 cm。然后将混凝土表层凿成蜂窝麻面状,凿除混凝土时应避开受力钢筋及分布钢筋,防止钢筋被切断,随后冲洗干净或用毛刷将碎屑清理干净,待表面干燥后浇筑C35细粒式混凝土。混凝土抗冻等级为F200,抗渗等级为W6,同时,混凝土中还应加入早强剂、快凝剂等添加剂,保证加固后的箱涵强度满足设计要求。

## 3 结 语

延安市方塔大道排水箱涵受滑坡损坏的段落出现6类病害,设计方案对出现结构性破坏和横向错位较大的节段进行了拆除新建,而对主体结构完好但存在渗漏和渗漏隐患的部位进行了加固维修,历经一年多的运营和监测,整体质量良好,经受住了一个完整雨季的考验,希望能对类似的工程尤其是工期要求紧张的应急抢险工程有所借鉴。